مدل‌سازی تأثیر دما و ضخامت بر چقرمگی شکست مخلوط‌های آسفالتی تحت مود I خالص

چکیده *باتوجه به افزایش تراکم وسایل نقلیه و به‌دنبال آن نیاز به احداث راه‌های جدید، سالانه هزینه هنگفتی صرف طراحی و اجرای روسازی‌های آسفالتی می‌گردد. همچنین عوامل متعددی از قبیل شرایط اقلیمی و وضعیت ترافیکی گوناگون جاده‌ها، به مرور زمان باعث ایجاد ترک‌هایی در سطح جاده می‌گردند که هزینه‌هایی نیز صرف تعمیر و نگهداری آن می‌شود. ترک حرارتی یکی از حالت‌های شدید خرابی در مناطق سرد می‌باشد. انتشار و رشد بیشتر در چنین ترک‌هایی ممکن است به دلیل تنش‌های کششی حرارتی ناشی از نوسانات دما رخ دهد که می‌تواند منجر به بروز شکست در روسازی آسفالتی تحت مود I خالص گردد. در این تحقیق سعی شده‌است که با تعیین چقرمگی شکست (K_{IC}) به عنوان یک عامل اصلی جهت تخمین ظرفیت باربری روسازی‌های ترک خورده در برابر رشد ترک به بررسی مقاومت مخلوط‌های آسفالتی تحت مود I در دماهای پایین پرداخته شود. بدین‌منظور پس از ساخت مخلوط‌های آسفالتی با قیر ۷۰-۶۰، نمونه‌های نیم‌دیسک با ترک مؤثر به عمق ۲۳ میلیمتر در سه ضخامت ۳۵، ۵۰ و ۶۵ میلیمتر تهیه گردید. سپس با انجام آزمایش شکست در سه دمای زیر صفر (۵-، ۱۵- و ۲۵- درجه سانتیگراد) و محاسبه میزان چقرمگی شکست با استفاده از بار بحرانی شکست، اطلاعات به‌دست‌آمده مورد ارزیابی قرارگرفت. نتایج کلی بیانگر آن بود که افزایش ضخامت نمونه‌ها و همچنین کاهش دما باعث افزایش در میزان چقرمگی شکست می‌گردد. در نهایت با استفاده از نرم‌افزار متلب، مدلی جهت تخمین مقدار چقرمگی شکست آسفالت براساس دو پارامتر دما و ضخامت نمونه ارائه گردید. مشخص شد که مدل ارائه شده می‌تواند مقدار چقرمگی شکست در مخلوط آسفالتی تهیه شده در تحقیق حاضر را در محدوده دمایی و ضخامت‌های مورد مطالعه، به‌خوبی پیش‌بینی نماید.*

واژه‌های کلیدی روسازی آسفالتی، شکست آسفالت، چقرمگی شکست، شکست مود I، کشش خالص.

Developing a Model for the Effect of Temperature and Thickness of Asphalt Mixture on Fracture Toughness under Pure Mode I

Abstract *A huge amount of money is spent every year on designing and constructing of asphalt pavements due to an increase in the number of vehicles and, consequently, a higher demand for constructions of new roads. In addition, overtime, different factors such as severe climates and roads traffic conditions create cracks on the road surface that also require spending money on roads maintenance. Thermal cracking is one of the major distress types in the cold regions. Further propagation of such cracks may occur because of tensile thermal stresses induced by temperature fluctuations which can result in pure mode I fracture mechanism in the asphalt pavement. This study aims to determine fracture toughness (K_{IC}) as a fundamental parameter for estimating the load bearing capacity of cracked pavements against crack propagation under mode I cracking in low temperatures. To this end, the asphalt mixtures were manufactured with AC 60/70 bitumen. Semi-circular bending (SCB) specimens with effective crack length (a=23 mm) have been prepared in three thickness (35, 50 and 65 mm). We collected data with conducting the fracture tests at three subzero temperatures (-5°C, -15°C and -25°C) and calculating the fracture toughness values using fracture loads. The results indicated that, in general, increasing specimens thickness and decreasing temperature increase fracture toughness. Finally, using MATLAB software, a model was developed to estimate the asphalt fracture toughness according to the two parameters of temperature and specimens thickness. It was determined that the proposed model can predict the values of fracture toughness in asphalt mixtures prepared on present study at the temperature and thickness range of the research.*

Key Words: Asphalt Pavement, Asphalt Fracture, Fracture Toughness, Mode I Fracture, Pure Tensile.

۱. مقدمه

راه‌ها نقش بسیار مهمی در ارتقای سطح کیفی زندگی دارند. امروزه حمل و نقل به‌عنوان یکی از شاخص‌های توسعه‌یافتگی در جوامع، به‌مانند گردش خون در کالبد اقتصاد هر کشور محسوب می‌گردد. حمل و نقل زمینی و جاده‌ای نیز از مهم‌ترین بخش‌های سیستم‌های حمل و نقل هستند. بدین‌جهت است که روسازی راه به‌عنوان بخشی از سازه راه، نقش کلیدی در عملکرد و تأمین سطح هموار و ایمن جاده‌ها به‌عهده دارد. بنابراین ساخت روسازی‌های با قابلیت باربری و عمر بالا و کیفیت مناسب و نیز نگهداری آن‌ها در شرایط عملکردی مناسب از اهمیت بسزایی برخوردار است.

مطابق نشریه ۲۳۴ (آیین نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران)، روسازی آسفالتی دارای عمر مفید مشخصی است [1]. دو عامل بار ترافیکی و تغییرات شرایط آب و هوایی، سبب شده‌است که این عمر مفید مقادیر کمتری را نسبت به آنچه در طراحی آن درنظر گرفته شده، نشان دهد. عملکرد ضعیف روسازی و عمر کوتاه آن ناشی از برخی عوامل طراحی و اجرا به شرح ذیل است که می‌توان برای دستیابی به روسازی با عملکرد مطلوب، کلیه این عوامل را به‌صورت مناسب طراحی و اجرا نمود:

- استفاده از مصالح نامرغوب در تهیه آسفالت با توجه به شرایط آب‌وهوایی و کاربری روسازی
- طرح اختلاط نامناسب مخلوط آسفالتی با توجه به شرایط و کاربری روسازی
- طراحی نامناسب روسازی و لایه‌های تشکیل دهنده آن برای مقادیر بار ترافیکی مورد نظر
- اجرا و نظارت ضعیف
- نگهداری نامناسب

تحقیقات حاکی از آن است که روسازی‌های آسفالتی در معرض خرابی‌های شدید وابسته به تنش قرار می‌گیرند. این خرابی‌ها مانند ترک‌خوردگی، عمدتاً ناشی از شکست[1] در مخلوط آسفالتی هستند [2]. همچنین در مناطق سردسیر، روسازی آسفالتی به دلیل ترک‌خوردگی در دمای پایین[2] منجر به خرابی زودرس می‌گردد [3]. بسیاری از محققان دریافتند که کاهش دما تا حد مشخصی باعث افزایش مقاومت در آسفالت شده و این مقاومت در دماهای پایین‌تر، کاهش می‌یابد. برخی مطالعات نشان داد که بالابردن سفتی قیر به عنوان یک متغیر اصلی جهت افزایش مقاومت به حساب می‌آید. علت این افزایش مقاومت، چسبیدگی مکانیکی بهتر قیر به‌علت کاهش دما است. به‌طور خاص، از دست‌دادن مقاومت کششی در روسازی آسفالتی به علت دمای پایین بوده که موجب ترک حرارتی در روسازی در مناطق سرد می‌گردد [4]. بنابراین درنظرگرفتن عملکرد دمای پایین در روش طراحی مخلوط آسفالتی برای مناطق با فصول یخبندان شدید از اولویت بالاتری برخوردار است. پیش‌بینی عمر خستگی می‌تواند نقش مؤثری در جلوگیری از گسترش ترک‌های خستگی و تعیین زمان مناسب جهت ترمیم و یا روکش مجدد روسازی ایفا نماید. پاریس[3] و اردوغان[4] در سال ۱۹۶۳ قانون نرخ رشد ترک[5] را جهت به‌کارگیری در مصالح همگن که خاصیت الاستیک خطی دارند، توسعه داده‌اند. براساس این قانون، مقادیری از ضرایب شدت تنش (K_{IC}) مصالح در طی فریند خستگی، به‌عنوان یکی از پارامترها جهت پیش‌بینی نرخ رشد ترک درنظر گرفته می‌شود [5].

---

[1] Fracture

[2] Low Temperature Cracking (LTC)

[3] Paris

[4] Erdogan

[5] Paris Law

درنتیجه لازم است به‌منظور بهبود در ویژگی‌های آسفالت، به بررسی رفتار شکست و ترک‌خوردگی در روسازی تحت دماهای پایین پرداخته شود تا با افزایش دوام این روسازی انعطاف‌پذیر و همچنین کاهش خسارت بر سطوح آن، از خسارات جانی، مالی و همینطور هزینه‌های مازاد جهت طراحی، ساخت و تعمیر و نگهداری تا حد زیادی کاسته شود.

۲. بیان مسأله

جهت بررسی رفتار شکست آسفالت در دماهای پایین در ابتدا به آشنایی مختصری از مکانیک شکست و تعاریفی در رابطه با ترک‌خوردگی حرارتی و نحوه بروز و انتشار ترک‌ها پرداخته می‌شود. در ادامه به صورت موردی، تحقیقات و تجربه برخی از پژوهشگران و پیشرفت‌های حاصل تشریح می‌گردد.

۲-۱. مکانیک شکست

جهت مطالعه ترک اولیه و انتشار ترک برای هر نوع مواد و مصالح از مکانیک شکست به عنوان یک ابزار قدرتمند استفاده می‌گردد. این روش برای کشف مکانیزم شکست در مخلوط‌های آسفالتی از اوایل دهه ۱۹۶۰ مورد استفاده قرارگرفت و در سال‌های ۱۹۹۰ و پس از آن محبوبیت چشمگیری را در جوامع تحقیقاتی از آن خود نموده‌است [4,6]. در این راستا پژوهشگران یسیاری از تئوری مکانیک شکست جهت ارزیابی شکست تُرد[۱] در مصالح قیری و آسفالتی استفاده نمودند و نشان دادند که در دمای خیلی کم می‌توان از تئوری گریفیت[۲] در رابطه با شکست ترد به‌منظور مطالعه رفتار شکست آسفالت، استفاده نمود. در این زمینه تحقیقات گسترده‌ای برای بررسی رفتار خستگی و شکست در روسازی‌های آسفالتی تحت دماهای پایین صورت پذیرفت. برخی از آن‌ها ضریب شدت تنش بحرانی (K_{IC}) یا همان چقرمگی شکست[۳] را براساس مکانیک شکست الاستیک خطی[۴] به عنوان شاخص ارزیابی شکست ترد در رابطه با پدیده ترک خوردگی در بتن آسفالتی مورد استفاده قراردادند. در واقع اگر چقرمگی شکست یک ماده پایین باشد، آن ماده به صورت ترد می‌شکند و هر اندازه چقرمگی شکست بالاتر رود، احتمال شکست نرم آن، افزایش می‌یابد. بسیاری دیگر نیز از K_{IC} به عنوان یک معیار خرابی در خستگی و یا شکست استاتیک در روسازی آسفالتی استفاده نمودند. همچنین روش انتگرال J، یک اندازه‌گیری از چقرمگی شکست در مکانیک شکست الاستوپلاستیک[5] به عنوان رویکردی دیگر جهت درک مشکلات ناشی از شکست در بتن آسفالتی به‌کار گرفته شد [4].

محققین رفتار آسفالت را در دماهای پایین، الاستیک خطی می‌دانند. زیرا در دمای زیر صفر، رفتار مخلوط آسفالتی به صورت شکننده و یا شبه‌شکننده است [7]. همچنین تحقیقات نشان می‌دهد که در این محدوده دمایی، تا حداکثر بار اعمالی بر روی آسفالت، این نوع روسازی به صورت الاستیک خطی رفتار کرده و شکست آن را باید بر اساس اصول مکانیک شکست الاستیک خطی، مدل نمود [8].

از این‌رو مکانیک شکست الاستیک خطی می‌تواند به عنوان یک ابزار مهندسی مناسب جهت بررسی پدیده ترک‌خوردگی در آسفالت به‌خصوص در شرایط دمایی پایین، مناسب باشد.

---

[۱] Brittle Fracture

[۲] Griffith

[۳] Fracture Toughness

[۴] Linear Elastic Fracture Mechanics (LEFM)

[۵] Elastic-Plastic Fracture Mechanics (EPFM)

۲-۲. ترک حرارتی یا ترک‌خوردگی در دمای پایین

ترک‌خوردگی یکی از عوامل ایجاد خرابی‌های زودرس در مخلوط‌های آسفالتی در مناطق سردسیر است که به واسطه عواملی از قبیل بارهای ترافیکی اعمال شده بر لایه‌های آسفالتی، مراحل ساخت و اجرای نادرست زیرسازی و روسازی و شرایط اقلیمی مانند: چرخه‌های دمایی فصلی و روزانه، چرخه‌های یخ‌زدگی و نفوذ آب به لایه‌های روسازی ایجاد می‌شود. ترک‌خوردگی پدیده‌ای است که در دو مرحله اتفاق می‌افتد؛ نخست وقوع ریزترک‌ها و سپس انتشار آن [7, 9]. ترک حرارتی یکی از حالت‌های شدید خرابی در مناطق سرد می‌باشد که اغلب می‌تواند باعث ایجاد ترک‌های عرضی می‌شود. انتشار و رشد بیشتر در چنین ترکی ممکن است به دلیل تنش‌های کششی حرارتی ناشی از نوسانات دما رخ دهد که می‌تواند منجر به بروز شکست در روسازی آسفالتی تحت مود I خالص گردد [7]. عموماً ترک‌خوردگی حرارتی را می‌توان با بکارگیری قیر نرم کاهش داد. اما به علت تغییرات آب و هوایی و افزایش احتمالی دما، استفاده از قیر نرم به دلیل احتمال وقوع پدیده شیارشدگی، نامناسب است [9].

۲-۳. ایجاد و گسترش ترک

در نظریه مربوط به مکانیک شکست برای تشخیص نحوه ایجاد و گسترش ترک در مصالح و لایه‌های روسازی، سه حالت متمایز (شکل ۱) بسته به نوع بارگذاری درنظر گرفته می‌شود که عبارتند از [10 و 11]:

۲-۳-۱. حالت اول (مود I): حالت کششی (بازشوندگی)

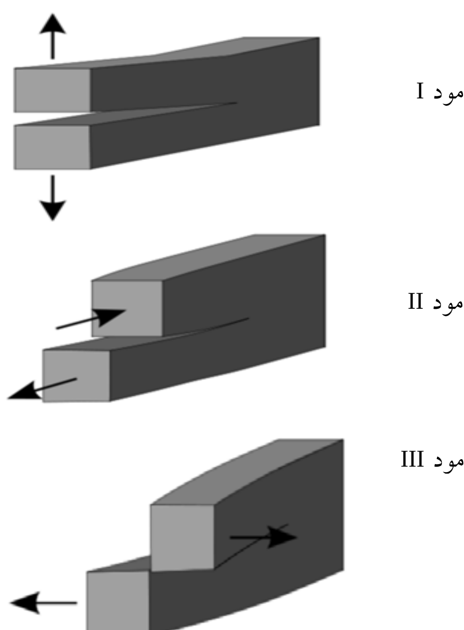
در این حالت وجوه ترک به سادگی از یکدیگر دور می‌شوند. این شکل از گسیختگی در اثر کشش خالص ناشی از گرادیان حرارتی (تغییرات دما، انبساط و انقباض مصالح) در عمق لایه‌ها ایجاد می‌شود و سپس در اثر خمش ناشی از بارگذاری و عبور ترافیک در لایه گسترش پیدا می‌کند.

۲-۳-۲. حالت دوم (مود II): حالت برشی (لغزشی)

در این حالت از ترک‌خوردگی وجوه ترک نسبت به هم در راستای موازی با صفحه ترک و در جهت عمود بر لبه ترک می‌لغزند. این نوع ترک در اثر تنش‌های برشی حاصل از بارگذاری و عبور ترافیک ایجاد می‌شود و سپس در لایه گسترش پیدا می‌کند.

۲-۳-۳. حالت سوم (مود III): حالت پارگی

در این حالت وجوه ترک نسبت به هم در راستای موازی با صفحه‌ی ترک و موازی با جبهه ترک، شروع به لغزش می‌نمایند. این شکل از ترک در اثر تنش‌های سطحی افقی بین چرخ و سطح روسازی که حاصل بارگذاری و عبور ترافیک است، ایجاد می‌شود و سپس در لایه گسترش پیدا می‌کند.



شکل ۱. انواع مودهای ترک‌خوردگی تحت انواع بارگذاری‌های مختلف [11]

ترک‌خوردگی در دمای پایین یکی از انواع خرابی روسازی‌های آسفالتی است که به صورت مود I خالص ظاهر می‌گردد. در سال‌های اخیر تلاش‌های متعددی [6, 12, 13, 14] جهت درک بهتر روند این نوع خرابی و رشد ترک در آسفالت و همچنین مقاومت آسفالت در برابر شکست تحت این حالت (مود I) از خرابی انجام شده‌است.

۳. پیشینه تحقیق

شکست ترد در مخلوط‌های آسفالتی در دمای پایین یکی از حالت‌های اصلی تخریب آسفالت می‌باشد. از این‌رو لازم است یک مقدار مطمئن برای چقرمگی شکست در مخلوط‌های آسفالتی، به عنوان یک پارامتر مهم در طراحی، شناخته‌شده باشد [7] و [15]. چقرمگی شکست در روسازی‌های آسفالتی به عنوان یک عامل اصلی جهت تخمین ظرفیت باربری و مقاومت در روسازی‌های ترک‌خورده در برابر رشد ترک درنظر گرفته می‌شود [16]. شرایط اقلیمی و بار ترافیکی، تأثیر فراوانی بر فرآیند شکست در مخلوط آسفالتی دارد. در این زمینه پژوهشگران مطالعاتی در مورد بررسی تأثیر مشخصات مخلوط آسفالتی شامل نوع قیر، دانه‌بندی و جنس مصالح سنگی، درصد فضای خالی، تغییرات دمایی و شرایط بارگذاری در مقاومت شکست مخلوط‌های آسفالتی انجام داده‌اند. در این مطالعات مشخص گردید که عملکرد ضعیف هر کدام از مصالح آسفالت در برابر گسیختگی، باعث کاهش عمر مفید روسازی و در نهایت منجر به شکست زودرس در روسازی می‌گردد.

از آن‌جا که انجام آزمایش شکست در لایه آسفالتی ترک‌دار در شرایط واقعی، پیچیده و پرهزینه است، لذا بررسی تجربی شرایط رشد ترک و بار بحرانی شکست با استفاده از نمونه‌های آزمایشگاهی مناسب انجام می‌گردد. یک نمونه مناسب آزمایشگاهی برای انجام آزمایش چقرمگی شکست باید دارای هندسه‌ای ساده بوده، تهیه و آماده‌سازی آن به سادگی انجام شود و امکان بارگذاری و آزمایش بر روی آن با استفاده از دستگاه‌های آزمایش و تکیه‌گاه‌های متداول آزمایشگاهی وجود داشته باشد. علاوه بر این، انتخاب نمونه‌ها باید به گونه‌ای باشد که تا حد ممکن شرایط تغییر شکل‌های ایجادشده در لایه آسفالتی سطح جاده را به خوبی شبیه‌سازی نماید تا با محاسبه آزمایشگاهی بار شکست در این نمونه‌ها تحت شرایط مختلف بارگذاری، بتوان رفتار رشد ترک و مقدار مقاومت شکست در لایه آسفالتی واقعی را تخمین زد.

نمونه‌های متعددی برای انجام آزمایش شکست در مخلوط‌های آسفالتی مورد استفاده قرار می‌گیرند که از میان آن‌ها می‌توان به نمونه‌های نیم‌دیسک خمشی ترک‌دار[۱]، دیسک خمشی ترک‌دار[۲]، تیر مستطیل‌شکل ترک‌دار لبه‌ای تحت بار خمش سه‌نقطه‌ای[۳]، نمونه مستطیل‌شکل متراکم تحت بار کششی[۴]، نمونه متراکم تحت بار کششی با مقطع دایره‌ای[5] و دیسک برزیلی[۶] اشاره نمود.

گلچین و صفایی با به‌کارگیری نمونه‌های نیم‌دیسک ترک‌دار دریافتند که با کاهش دما، قیر موجود در مخلوط آسفالتی منقبض و منجر به افزایش ویسکوزیته شده و در نتیجه مقاومت قیر افزایش می‌یابد. در واقع می‌توان نتیجه گرفت که با کاهش دما، مقاومت قیر و چسبندگی بین مصالح سنگی و قیر افزایش یافته که منجر به افزایش مقاومت شکست آسفالت گرم در مود خالص کششی شده‌است [17].

---

[۱] Semi-Circular Bend (SCB)

[۲] Edge Notched Disc Bend (ENDB)

[۳] Single Edge Notch Beam (SENB)

[۴] Compact Tension (CT)

[۵] Disc-shaped Compact Tension (DCT)

[۶] Brazilian Disk (BD)

در تلاشی دیگر جعفری و همکاران با بررسی مقاومت شکست آسفالت تحت مود III دریافتند که با کاهش دما و همچنین افزایش ضخامت در نمونه‌های دیسک خمشی ترک‌دار، مقدار چقرمگی شکست افزایش می‌یابد. آن‌ها همچنین با بررسی مقادیر چقرمگی شکست در مخلوط‌های آسفالتی تحت مود I و III بر روی نمونه‌های دیسک خمشی ترک‌دار دریافتند که شکست در مخلوط‌های آسفالتی تحت مود I مقادیر بالاتری نسبت به مود III دارند. در نتیجه اظهار داشتند که مخلوط‌های آسفالتی در برابر شکست تحت مود III، رفتاری ضعیف‌تر (مقادیر چقرمگی شکست پایین‌تر) نسبت به مود I (مقادیر چقرمگی شکست بالاتر) نشان می‌دهند [18].

کیم[1] و همکاران با استفاده از روش ترک مؤثر اصلاح‌شده[2] در نمونه‌های تیر مستطیل‌شکل تحت بار خمش سه‌نقطه‌ای، به مقایسه چقرمگی شکست آسفالت اصلاح‌شده پلیمری و آسفالت معمولی تحت دمای پایین (زیر ۵- درجه سانتیگراد) پرداختند. نتایج نشان داد که در دمای ۱۰- درجه سانتیگراد و پایین‌تر از آن، مقادیر K_{IC} در آسفالت اصلاح‌شده بیشتر از آسفالت معمولی می‌باشد.

همچنین مقادیر بهبود یافته K_{IC} در دمای ۲۰- درجه سانتیگراد و پایین‌تر از آن، افزایش مقاومت در برابر شکست در دماهای پایین را درپی داشت. به طور کلی این تحقیق نشان داد که آسفالت اصلاح‌شده پلیمری تحت دمای پایین از استحکام بالاتری نسبت به آسفالت معمولی برخوردار بوده‌است و می‌تواند عمر بیشتری تا زمان شکست در دماهای پایین‌تر سپری کند [19].

خی[3] و همکاران به پژوهشی در مورد مکانیک شکست مخلوط آسفالتی تهیه‌شده با گِنیس[4] تحت آزمون کشش مستقیم پرداختند و در آن، تأثیر نوع قیر، دما و سرعت بارگذاری را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج مطالعه نشان داد که دما تأثیر زیادی بر حالت عمده شکست در مخلوط آسفالتی دارد. با تغییر دما از ۱۵ به ۲۵ درجه سانتیگراد، تغییر قابل توجهی در درصد شکست چسبندگی مشاهده شده‌است. همچنین با تجزیه و تحلیل تصاویر مشخص گردید، سرعت بالاتر در بارگذاری منجر به افزایش احتمال شکست در چسبندگی می‌گردد [2].

علیها و همکاران تحقیقی را پیرامون تعیین چقرمگی شکست در مخلوط‌های آسفالتی با ترکیب‌های گوناگون با استفاده از نمونه‌های خمشی نیم‌دیسک انجام دادند. در این تحقیق تأثیر عواملی چون قطر سنگدانه، درصد فضای خالی و نوع قیر بر روی نیروی شکست و چقرمگی شکست مخلوط‌ها در دمای پایین (۱۵- درجه سانتیگراد) مورد بررسی قرارگرفت. نتایج حاکی از آن بود که خطر شکست ترد در دمای پایین در مخلوط‌های آسفالتی حاوی سنگدانه‌های سیلیسی، سنگدانه‌های با قطر کمتر، درصد فضای خالی بیشتر و قیرهای با درجه نفوذ بالاتر افزایش می‌یابد [16].

رزمی و میرسیار به تعیین چقرمگی شکست آسفالت اصلاح‌شده با خرده‌لاستیک و ساسوبیت در دماهای پایین پرداختند. آزمون‌های شکست با مود ترکیبی I و II با استفاده از نمونه‌های نیم‌دیسک ترکدار که بارگذاری آن با تغییر در زاویه ترک یا با تغییر در فاصله تکیه‌گاهی نسبت به موقعیت ترک قائم و یا ایجاد یک شیار قائم نامتقارن صورت می‌پذیرد، انجام شد. سپس ضریب شدت تنش بحرانی در مود I خالص، مود II خالص و

[1] Kim

[2] Modified Effective Crack Model

[3] Xie

[4] Gneiss

مود ترکیبی I و II محاسبه گردید. نتایج تجربی نشان داد که مقاومت شکست مؤثر در مود ترکیبی I و II کمتر از مقادیر مقاومت شکست در حالت‌های مود I خالص و مود II خالص بوده‌است. این بدان معنی است که خطر ترک‌خوردگی در حالت ترکیبی کششی-برشی بیشتر از شرایط بارگذاری کشش خالص و یا برش خالص می-باشد [20].

در تحقیقی دیگر علیها و همکاران با استفاده از نمونه‌های دیسک خمشی ترک‌دار، مقاومت شکست در مخلوط‌های آسفالتی را تحت مود I ارزیابی نمودند. آن-ها در این تحقیق با انجام آزمون‌های متعددی بر روی مخلوط‌های آسفالتی، تأثیر عواملی از قبیل درصدهای متفاوت فضای خالی و اندازه نمونه‌ها (ارتفاع دیسک) را بر مقادیر نیروی شکست و چقرمگی شکست تحت دمای پایین (۰، ۱۲- و ۲۴- درجه سانتیگراد) مورد بررسی قرار دادند. نتایج این بررسی نشان داد که تغییر عواملی چون افزایش ارتفاع نمونه و همچنین کاهش درصد فضای خالی و کاهش دمای آزمایش موجب افزایش قابل توجهی در مقادیر مربوط به چقرمگی شکست در نمونه‌های آزمایش‌شده گردیده‌است. همچنین مشخص گردید که ارتفاع نمونه‌ها بیشترین تأثیر را بر مقاومت شکست مخلوط‌های آسفالتی مورد آزمایش داشته‌است [21].

فخری و همکاران تأثیر نوع قیر، سنگدانه و درصد فضای خالی را بر انرژی شکست آسفالت در شرایط دمایی متوسط و تحت ۳ حالت (مود خالص I، مود خالص II و ترکیب مود I و II) بررسی نمودند. آن‌ها با انجام آزمایش بر روی ۱۲۶ نمونه نیم‌دیسک دریافتند که افزایش دما در هر سه حالت مورد آزمایش منجر به کاهش نیروی شکست گردیده‌است که عمدتاً به دلیل تضعیف در ساختار شیمیایی قیر می‌باشد. همچنین مشخص گردید که در دمای بالاتر، نمونه‌های آسفالتی با سنگدانه سیلیسی و آهکی مقاومت شکست تقریباً مشابهی دارند. اما در دماهای پایین‌تر، سنگدانه آهکی مقاومت شکست بیشتری را نسبت به سنگدانه سیلیسی در مخلوط‌های مورد آزمایش نشان می‌دهد [22]. آن‌ها همچنین به این نتیجه دست یافتند که با توجه به طیف گسترده‌ای از درجه حرارت (از زیر صفر درجه سانتیگراد تا دماهای بالا)، مقاومت شکست مخلوط‌های آسفالتی با افزایش دما تا صفر درجه سانتیگراد به حداکثر مقدار خود افزایش و پس از آن کاهش می‌یابد.

در سال ۲۰۱۸ مطالعه‌ای با هدف ارزیابی تأثیر سنگدانه‌هایی از جنس آذرین و سیلیسی-آهکی، نوع قیر، دما، قیر بازیافتی و درصد فضای خالی بر چقرمگی شکست در مخلوط‌های آسفالتی توسط سام[1] و همکاران [9] در دمای پایین و متوسط (۲۰-، ۵- و ۱۰ درجه سانتیگراد) انجام گردید. نتایج تحقیق آن‌ها بر روی نمونه‌های نیم‌دیسک نشان داد که دما، درصد قیر بازیافتی و اثر همزمان درجه عملکردی قیر با دما، مؤثرترین پارامترها در میزان چقرمگی شکست هستند. همچنین مشاهده گردید که تأثیر درجه عملکردی قیر در مقایسه با دیگر عوامل ناچیز است.

۴. اهداف پژوهش

اهداف این پژوهش به شرح ذیل در نظر گرفته‌شد:

- تاثیر تغییرات ضخامت و دما بر نیرو و انرژی شکست تحت مود I.
- ارائه مدل تغییرات چقرمگی شکست آسفالت با تغییرات دما و ضخامت نمونه.

[1] Some´

۵. روش تحقیق

در این پژوهش پس از انتخاب مصالح مورد استفاده بر اساس مشخصات فنی آن‌ها و دانه‌بندی سنگدانه‌ها، درصد قیر بهینه با به‌کارگیری طرح اختلاط مارشال مشخص و مخلوط‌های آسفالتی با درصد قیر بهینه و درصد فضای خالی تعیین‌شده توسط متراکم‌کننده دورانی، ساخته شدند. در ادامه نمونه‌ها به شکل نیم دیسک در سه ضخامت گوناگون برش داده شده و با ایجاد شیار قائم بر روی آن‌ها به انجام آزمایش شکست در سه دمای زیر صفر پرداخته شد که در ادامه، مراحل انجام تحقیق شرح داده شده‌است.

۵-۱. مصالح مصرفی در ساخت مخلوط‌های آسفالتی

۵-۱-۱. مصالح سنگی و دانه‌بندی آن

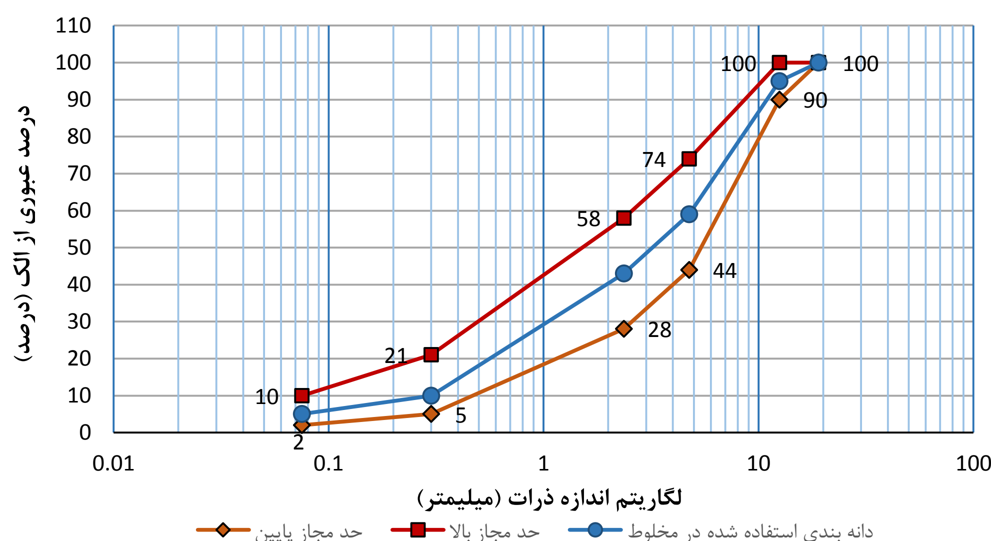
سنگدانه مصرفی در ساخت مخلوط‌های آسفالتی از نوع مصالح سنگی کوهی حاوی درصد بالای آهک بوده و از معدن چرم‌شهر ورامین تهیه شده‌است. با توجه به اینکه این مصالح بخش اعظمی از مخلوط را شامل می‌شوند نیاز به بررسی مشخصات آن‌ها می‌باشد. از این‌رو سنگدانه‌ها پس از الک‌شدن، در اندازه‌های مورد نیاز جمع‌آوری گردیده و پس از انجام آزمایش‌های لازم بر روی آن‌ها، خصوصیات مصالح سنگی به شرح جدول ۱ مشخص گردید. نتایج به دست‌آمده از آزمایش‌ها با رعایت الزامات نشریه شماره ۲۳۴ در محدوده‌ی مقادیر قابل قبول بر اساس مشخصات مربوط به مصالح سنگی مورد استفاده در رویه آسفالتی است.

در این تحقیق از حدود دانه‌بندی شماره ۴ مشخص شده در آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران (نشریه ۲۳۴) با بزرگترین اندازه اسمی سنگدانه ۱۹ میلیمتر به عنوان دانه‌بندی مورد استفاده در لایه رویه آسفالتی در ساخت نمونه‌های آسفالتی به‌کار گرفته شده‌است.

در شکل ۲ می‌توان منحنی دانه‌بندی استفاده شده در ساخت مخلوط‌های آسفالتی را مشاهده نمود.

جدول ۱. مشخصات مصالح سنگی مورد استفاده در مخلوط‌های آسفالتی

شرح آزمایش	شماره استاندارد	مقدار	مقدار قابل قبول
وزن مخصوص (Gr/cm^3)	ASTM C127	۲/۷۱	–
حداکثر سایش لس‌آنجلس (درصد)	ASTM C131	۱۵	$\leq$ ۲۵
حداکثر جذب آب درشت‌دانه (درصد)	ASTM C127	۲/۳۵۸	$\leq$ ۲/۵۰
حداکثر جذب آب ریزدانه (درصد)	ASTM C128	۲/۴۰	$\leq$ ۲/۵۰
شکستگی – یک‌جهت (درصد)	ASTM D5821	۹۹	۹۵ $\leq$
شکستگی – دوجهت (درصد)	ASTM D5821	۹۷	۹۰ $\leq$
ارزش ماسه‌ای (درصد)	ASTM D2419	۷۹	$\geq$ ۵۰
حداکثر افت وزنی در برابر سولفات سدیم (درصد)	ASTM C88	درشت‌دانه ۰/۲، ریزدانه	$\leq$ ۱۲



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی مصالح سنگی مورد استفاده در مخلوط آسفالتی

۵-۱-۲. قیر مصرفی

در این پژوهش از قیر خالص ۷۰-۶۰ محصول شرکت پالایشگاه نفت جی در ساخت مخلوط‌های آسفالتی استفاده گردیده‌است. با توجه به درجه عملکردی قیرها، قیر با درجه نفوذ ۷۰-۶۰ در مقایسه با قیر ۱۰۰-۸۵ از سفتی بالاتری برخوردار است. با توجه به این‌که قیر ۷۰-۶۰ متداول‌ترین نوع قیر در ساخت روسازی آسفالتی کشور می‌باشد [16]، لذا استفاده از آن در این پژوهش پیشنهاد گردیده‌است. مشخصات مربوط به قیر به‌کارگرفته‌شده در این تحقیق در جدول ۲ ذکر شده است.

جدول ۲. مشخصات قیر استفاده‌شده در ساخت مخلوط‌های آسفالتی

شرح آزمایش	واحد	استاندارد	نتایج	قیر ۷۰-۶۰ حداقل	قیر ۷۰-۶۰ حداکثر
وزن مخصوص در ۲۵ °C	gr/cm^3	ASTM D70	۱/۰۲۸	-	-
درجه اشتعال (روباز-کلولند)	°C	ASTM D92	۲۹۸	۲۳۲	-
درجه نفوذ در ۲۵ °C	0.1 mm	ASTM D5	۶۲	۶۰	۷۰
انگمی (کشش قیر در ۲۵ °C)	cm	ASTM D113	بیش از ۱۰۰	۵۰	-
نقطه نرمی (ساچمه-حلقه)	°C	ASTM D36	۴۸/۷	۴۹	۵۶
ویسکوزیته در ۱۲۰ °C	mm^2/S	ASTM D2170	۸۳۲	-	-
ویسکوزیته در ۱۳۵ °C	mm^2/S	ASTM D2170	۳۹۳	-	-
ویسکوزیته در ۱۵۰ °C	mm^2/S	ASTM D2170	۱۵۶	-	-
حلالیت در تری‌کلرواتیلن	-	ASTM D2042	۹۹/۹	۹۹	-
لعاب نازک قیر (۱۶۳ °C-پنج ساعت)	°C	ASTM D1754	۰/۰۸	-	۰/۸
شاخص درجه نفوذ (PI)	-	-	-۰/۶۴	-۲	۲

۵-۲. ساخت نمونه‌های ژیراتوری

پس از تعیین درصد قیر بهینه در مخلوط‌های آسفالتی مختلف، ساخت نمونه‌ها با فضای خالی به میزان ۴ درصد با استفاده از دستگاه متراکم‌کننده چرخشی[۱] صورت گرفت. به همین منظور قبل از عمل اختلاط، مصالح سنگی دانه‌بندی‌شده جهت ساخت مخلوط‌های آسفالتی، به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۷۶ درجه سانتیگراد نگهداری شده تا اولاً رطوبت مصالح از بین برود و ثانیاً مصالح برای اختلاط با قیر و تهیه مخلوط آماده گردد. همچنین مطابق نشریه (۲۳۴)، لازم است که دمای قیر به حدی افزایش یابد که ویسکوزیته قیر در آن دما در محدوده (۲۰ ± ۱۷۰) سانتی‌استوکس جهت اختلاط و (۳۰ ± ۲۸۰) سانتی‌استوکس جهت تراکم باشد. بدین ترتیب پس از رسم منحنی ویسکوزیته-دما، دمای اختلاط قیر و مصالح سنگی، حدود ۱۳۷-۱۴۲ درجه سانتیگراد و بازه دمایی تراکم حدود ۱۱۹-۱۲۷ درجه سانتیگراد، تعیین شد.

سپس عمل اضافه‌نمودن قیر (با درصد قیر بهینه[۲] به میزان ۵/۳ درصد) به مصالح سنگی در ظرفی با گنجایش مشخص که از پیش گرم شده‌است، صورت پذیرفت. پس از آن مخلوط در داخل قالب‌های به قطر ۱۵ سانتیمتر ریخته شده و متراکم گردد. در این تحقیق جهت تهیه مخلوط‌های آسفالتی، نمونه‌ها با تعداد دوران ۹۰ چرخش ژیراتوری با سرعت دوران ۳۰ دور بر دقیقه با فشار ۶۰۰ کیلوپاسکال و با زاویه داخلی قالب ۱/۲۵ متراکم گردیده‌اند. در نهایت مخلوط‌های استوانه‌ای آسفالتی به قطر ۱۵ سانتیمتر و ارتفاع حدود ۱۲ سانتیمتر با وزن تقریبی ۴۷۰۰ گرم، آماده گردید.

۵-۳. نمونه‌های نیم‌دیسک و آماده‌سازی آن

از میان نمونه‌های آزمایشگاهی، نمونه‌های استوانه‌ای به‌دلیل امکان تهیه ساده آن‌ها به‌وسیله دستگاه تراکم مارشال یا ژیراتوری و یا مغزه‌های به‌دست‌آمده از سطح جاده‌ها، نمونه‌های مناسب‌تری برای انجام آزمایش‌های مختلف در مخلوط‌های آسفالتی می‌باشند که به دو شکل کلی با سطح مقطع دایره‌ای (دیسک برزیلی) و نیم‌دایره‌ای (نیم‌دیسک) مورد استفاده قرار می‌گیرند.

باتوجه به اینکه ایجاد ترک در نمونه‌های دایره‌ای (به صورت داخلی و در مرکز استوانه) نسبت به نمونه‌های نیم‌دیسک (با ترک لبه‌ای) پیچیده‌تر و سخت‌تر است، نمونه‌های نیم‌دیسک، نمونه‌های مناسبی جهت سهولت در انجام مراحل آزمایشگاهی درنظر گرفته می‌شود.

مزیت دیگر استفاده از نمونه‌های نیم‌دیسک، امکان ایجاد شیار به صورت قائم و یا تحت هر زاویه مایل می‌باشد. همچنین انجام آزمایش‌های ساده بر روی این نمونه‌ها با استفاده از دستگاه‌ها و تکیه‌گاه‌های متداول آزمایشگاهی امکان‌پذیر است [7, 8]. بنابراین در این تحقیق از نمونه‌های نیم‌دیسک ترک‌دار جهت تعیین و ارزیابی چقرمگی شکست در مخلوط‌های آسفالتی استفاده گردیده است.

مخلوط‌های آسفالتی پس از تهیه در دو مرحله برش داده‌شد. در مرحله اول، برش مخلوط‌های استوانه‌ای جهت تبدیل به دیسک‌های دایره‌ای در سه ضخامت متفاوت ۳۵، ۵۰ و ۶۵ میلیمتر صورت پذیرفت. در مرحله دوم، هر یک از دیسک‌ها پس از دونیم شدن به دو نیم‌دیسک تبدیل شده‌اند.

در ادامه جهت تهیه نمونه‌های نیم‌دیسک برای انجام آزمایش، ابتدا سطح برش داده‌شده هر یک از نیم دیسک‌ها توسط دستگاه فرز صاف و صیقلی گردید. در مرحله آخر با توجه به فرض وجود ترک اولیه در نمونه‌ها، با

[۱] Gyratory Compactor

[۲] Optimum Bitumen Content (OBC)

استفاده از تیغه الماسی، شیاری عمود با نوک خطی، به عمق ۲۳ میلیمتر به عرض شکاف ۲ میلیمتر به عنوان ترک لبه‌ای در قسمت میانی سطح صیقلی ایجاد گردید. بدین ترتیب نمونه‌های نیم‌دیسک ترک‌دار مورد نیاز برای انجام آزمایش شکست تحت بارگذاری مود I به تعداد ۴۵ نمونه تهیه گردید.

۵-۴. دمای آزمایش شکست

دمای آزمایش به عنوان یکی از عوامل مهم و تأثیرگذار بر مقاومت شکست در مخلوط‌های آسفالتی درنظر گرفته می‌شود. با توجه به رفتار ویسکوالاستیسیته قیر در دماهای مختلف و علم بر اینکه رفتار قیر در دماهای پایین به سمت الاستیک میل می‌کند و این امر موجب افزایش سفتی در قیر و درنتیجه باعث ترک‌خورگی و شکست ترد در آسفالت می‌گردد.

بنابراین در این تحقیق جهت ارزیابی میزان شکست آسفالت، از سه دمای زیر صفر (۵-، ۱۵- و ۲۵- درجه سانتیگراد) در انجام آزمایش استفاده گردیده‌است. به همین منظور قبل از شروع آزمایش، نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت جهت رسیدن به دمای مورد نیاز در سردخانه نگهداری شدند.

۵-۵. آزمایش شکست

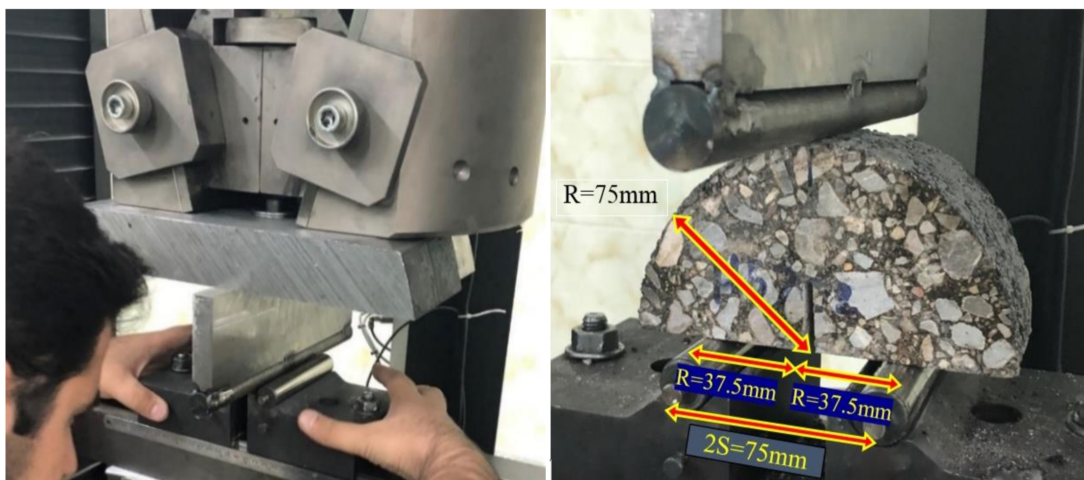
انجام آزمایش شکست با استفاده از دستگاه گالدابینی (کوآسار ۶۰۰)[1] تحت بارگذاری منوتونیک با نرخ ثابت بارگذاری صورت پذیرفت. این دستگاه با ترسیم نمودار بار–جابجایی، قابلیت اندازه‌گیری بار بحرانی شکست در مخلوط‌های آسفالتی را دارد.

نمونه‌ها پس از نگهداری در سردخانه به مدت ۴۸ ساعت جهت رسیدن به دمای مورد نیاز آزمایش، به ترتیب از سردخانه خارج شده و سریعاً در دستگاه آزمایش در محل تکیه‌گاه‌های تنظیم‌شده، قرار داده شد و بارگذاری بر روی آنها صورت گرفت. با توجه به اینکه تغییر دمای احتمالی نمونه‌ها در طول آزمایش ناچیز باشد، فاصله زمانی خروج نمونه‌ها از سردخانه و شروع بارگذاری به حداقل رسید که این فرآیند حداکثر به مدت ۱۰ ثانیه صورت پذیرفت.

به‌منظور بارگذاری تحت مود I، فاصله تکیه‌گاهی قبل از شروع آزمون با درنظرگرفتن $\frac{S}{R} = 0.5$ (که در آن S و R به ترتیب؛ فاصله امتداد نقطه بارگذاری تا تکیه‌گاه و شعاع نمونه‌های نیم‌دیسک بر حسب میلیمتر می‌باشند) به میزان 2S=75mm تنظیم گردید و نمونه‌ها پس از استقرار در محل مورد نظر بر روی تکیه‌گاه‌ها و قراردادن فک بالایی بر روی بالاترین نقطه در مرکز کمان نمونه (در امتداد ترک پیش‌فرض ایجادشده) تحت بارگذاری سه‌نقطه‌ای با نرخ ثابت ۵ میلیمتر بر دقیقه قرار گرفتند.

شکل ۳ نحوه تنظیم فواصل تکیه‌گاهی، موقعیت قرارگیری نمونه‌ها بر روی تکیه‌گاه‌ها و همچنین فواصل تکیه‌گاهی نسبت به ترک را نشان می‌دهد. لازم به توضیح است که چون ضخامت نمونه‌ها کم است، حالت تنش صفحه‌ای در آزمون شکست حاکم است.

[1] GALDABINI- QUASAR 600



شکل ۳. تنظیم فواصل تکیه‌گاهی و موقعیت قرارگیری نمونه بر روی تکیه‌گاه

۵-۶. محاسبه میزان چقرمگی شکست

با انجام آزمایش شکست نمونه‌ها، دو مقدار بار شکست (با دقت یک دهم نیوتن) و انرژی شکست برای هر یک از آن‌ها ثبت گردید. مطالعات عددی و تجربی علیها و همکاران [16] نشان داد که چقرمگی شکست در نمونه‌های نیم‌دیسک تحت مود I از رابطه ۱ قابل محاسبه خواهد بود. بنابراین در این تحقیق میزان چقرمگی شکست تحت بارگذاری مود I (K_{IC}) برای هر یک از نمونه‌های شکسته شده مطابق رابطه ۱ محاسبه گردید:

$$K_{IC} = \frac{P_f}{2Rt}\sqrt{\pi a}Y_I(\frac{a}{R},\frac{S}{R}) \qquad (۱)$$

که در آن:

K_{IC} : چقرمگی شکست (بر حسب $MPa.m^{0.5}$)،

P_f : بار بحرانی شکست (بر حسب نیوتون)،

R : شعاع نمونه‌های نیم‌دیسک (بر حسب میلیمتر)،

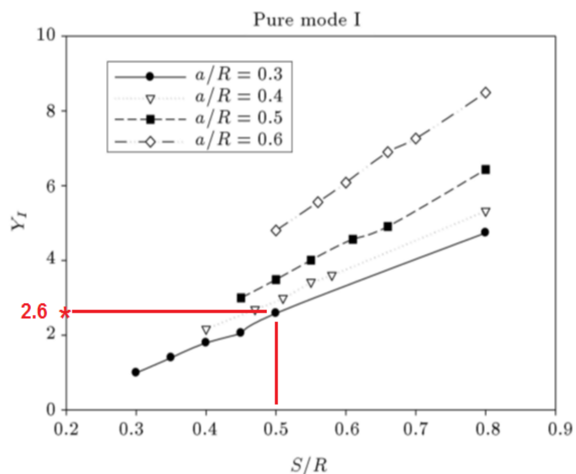
t : ضخامت نمونه‌های نیم‌دیسک (بر حسب میلیمتر)،

a : طول ترک یا همان عمق شیار در نمونه‌های نیم‌دیسک (بر حسب متر)،

S : فاصله امتداد نقطه بارگذاری تا تکیه‌گاه (بر حسب میلیمتر)،

Y_I : ضریب هندسی نمونه‌های نیم‌دیسک تحت مود I (تابعی از دو نسبت $\frac{a}{R}$ و $\frac{S}{R}$).

برای به‌دست آوردن مقدار Y_I تعدادی راه‌حل‌های عددی و تحلیلی در دسترس می‌باشد. به عنوان مثال آیت‌اللهی و علیها [23] ضرایب هندسی برای نمونه‌های نیم‌دیسک را تحت شرایط هندسی و بارگذاری‌های گوناگون در دو حالت مود I و مود II تحلیل و محاسبه نموده‌اند. شکل ۴ مقادیر Y_I تحت مود I خالص را به‌ازای نسبت‌های گوناگونی از $\frac{a}{R}$ (۰/۳، ۰/۴، ۰/۵ و ۰/۶) و $\frac{S}{R}$ با مقادیر مختلف حاصل از نتایج آیت‌اللهی و علیها را نشان می‌دهد [16].



شکل ۴. تغییرات Y_I تحت مود I خالص در نمونه‌های نیم‌دیسک برای دو نسبت $\frac{a}{R}$ و $\frac{S}{R}$ [16]

۶. نتایج آزمون شکست

نمونه‌های نیم‌دیسک با فرض ترک اولیه به عمق تقریبی ۲۳ میلیمتر در سه ضخامت گوناگون (۳۵، ۵۰ و ۶۵ میلیمتر) و تحت سه دمای مختلف زیر صفر (۵-، ۱۵- و ۲۵- درجه سانتیگراد) مورد آزمایش قرارگرفتند. این آزمون با استفاده از دستگاه گالدابینی (کوآسار ۶۰۰) تحت بارگذاری مود I با نرخ ثابت ۵ میلیمتر بر دقیقه انجام گردید. این دستگاه طی هر مرحله شکست با ترسیم منحنی بار-جابجایی، دو مقدار نیروی شکست و انرژی شکست را برای هر یک از نمونه‌های شکسته‌شده ارائه نمود.

پس از ثبت نهایی بار شکست حاصل از آزمایش، مقادیر مربوط به K_{IC} برای مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از معادله ۱ محاسبه گردید که پارامترهای این معادله براساس فرضیات تحقیق حاضر مطابق ذیل هستند:

P_f: بار بحرانی شکست بر حسب نیوتون دارای مقادیری به‌دست‌آمده از آزمایش که مقادیر آن مطابق جدول ۳ است.

R: شعاع نمونه‌ها که به مقدار ۷۵ میلیمتر است.

t: ضخامت نمونه‌ها که دارای سه مقدار ۳۵، ۵۰ و ۶۵ میلیمتر است.

a: طول ترک یا همان عمق شیار در نمونه‌ها دارای مقداری بین ۲۲ الی ۲۳ میلیمتر بوده که به طور میانگین ۲۲/۵ میلیمتر درنظر گرفته می‌شود. (برای اینکه مقدار چقرمگی شکست بر حسب $MPa.m^{0.5}$ به‌دست آید، مقدار a باید برحسب متر در معادله ۱ قرار داده شود.)

S: فاصله امتداد نقطه بارگذاری تا تکیه‌گاه که به میزان ۳۷/۵ میلیمتر است.

Y_I: ضریب هندسی نمونه‌ها تحت مود I خالص که مطابق شکل ۴، ($\frac{a}{R}=\frac{22.5}{75}=0.3$ و $\frac{S}{R}=\frac{37.5}{75}=0.5$) برابر ۲/۶۰ درنظر گرفته می‌شود.

در جدول ۳ مقادیر بار شکست (P_f) و انرژی شکست (E) حاصل از آزمایش شکست بر روی نمونه-های تحقیق حاضر ارائه شده‌است. همچنین با انتخاب یک مقدار متوسط به عنوان بار شکست میانگین از هر ۵ نمونه آزمایش‌شده به‌ازای هر یک از ضخامت‌ها تحت هر یک از دماهای آزمون، مجموعاً ۹ مقدار چقرمگی شکست با استفاده از معادله ۱ برای نمونه‌ها به‌دست آمد که در جدول ۴ ارائه گردیده‌است.

در این جداول، نمونه‌ها با نماد X/Y/Z نشان داده شده‌اند که در آن نماد X نشان‌دهنده ضخامت نمونه (۳۵، ۵۰ و ۶۵ میلیمتر)، نماد Y نشان‌دهنده دمای آزمایش (۵-، ۱۵- و ۲۵- درجه سانتیگراد) و نماد Z نشان‌دهنده شماره نمونه و تکرار آزمایش می‌باشد.

جدول ۳. نتایج انرژی شکست (E) و بار بحرانی شکست (P_f)

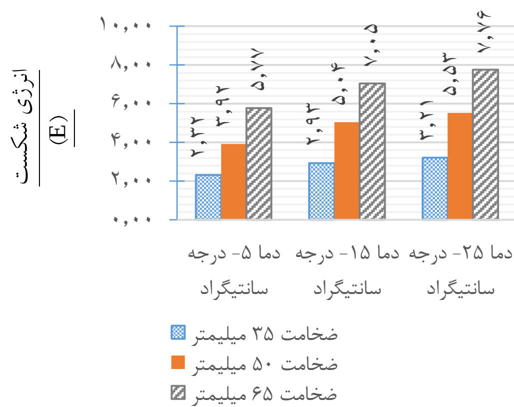
انحراف معیار بار بحرانی شکست	واریانس بار بحرانی شکست	میانگین بار بحرانی شکست P_f (N)	بار بحرانی شکست P_f (N)	انحراف معیار انرژی شکست	واریانس انرژی شکست	میانگین انرژی شکست E (j)	انرژی شکست E (j)	X / Y / Z
۸۱۲/۵	۶۶۰۱۲۰/۰	۶۷۸۰/۰	۶۱۲۰	۰/۵۶۶	۰/۳۲۰	۲/۳۲	۱/۸۵	۳۵ / -۵ / ۱
			۵۹۹۰				۲/۲۱	۳۵ / -۵ / ۲
			۷۳۴۰				۱/۶۵	۳۵ / -۵ / ۳
			۸۱۰۰				۳/۲	۳۵ / -۵ / ۴
			۶۳۵۰				۲/۷	۳۵ / -۵ / ۵
۸۰۳/۰	۶۴۴۸۱۶/۶	۷۸۱۸/۸	۷۲۳۵	۰/۸۰۷	۰/۶۵۱	۲/۹۳	۲/۷۵	۳۵ / -۱۵ / ۱
			۶۹۲۸				۱/۹۵	۳۵ / -۱۵ / ۲
			۸۱۲۰				۳/۲۵	۳۵ / -۱۵ / ۳
			۹۲۱۵				۴/۳	۳۵ / -۱۵ / ۴
			۷۵۹۶				۲/۴	۳۵ / -۱۵ / ۵
۹۵۳/۶	۹۰۹۳۴۶/۰	۸۴۸۸/۰	۷۷۹۰	۰/۷۴۷	۰/۵۵۸	۳/۲۱	۲/۶۸	۳۵ / -۲۵ / ۱
			۸۴۳۵				۳/۲۵	۳۵ / -۲۵ / ۲
			۷۲۵۰				۲/۳	۳۵ / -۲۵ / ۳
			۱۰۰۰۵				۴/۵	۳۵ / -۲۵ / ۴
			۸۹۶۰				۳/۳۴	۳۵ / -۲۵ / ۵
۱۳۱۶/۸	۱۷۳۴۰۲۴/۰	۱۱۶۸۴/۰	۱۰۸۰۰	۰/۹۳۷	۰/۸۷۷	۳/۹۲	۳/۲	۵۰ / -۵ / ۱
			۱۰۲۵۰				۳/۵	۵۰ / -۵ / ۲
			۱۲۳۰۰				۴/۸۵	۵۰ / -۵ / ۳
			۱۳۹۵۰				۵/۲	۵۰ / -۵ / ۴
			۱۱۱۲۰				۲/۸۳	۵۰ / -۵ / ۵
۱۴۶۰/۰	۲۱۳۱۶۶۴/۰	۱۳۳۵۹/۰	۱۲۴۹۰	۱/۲۷۶	۱/۶۲۸	۵/۰۴	۳/۴۲	۵۰ / -۱۵ / ۱
			۱۳۸۷۰				۴/۷	۵۰ / -۱۵ / ۲
			۱۱۶۰۰				۴/۲۵	۵۰ / -۱۵ / ۳
			۱۲۹۵۰				۵/۷۱	۵۰ / -۱۵ / ۴
			۱۵۸۸۵				۷/۱۲	۵۰ / -۱۵ / ۵
۱۵۹۷/۸	۲۵۵۲۹۳۶/۰	۱۴۵۷۲/۰	۱۷۱۲۰	۱/۳۰۳	۱/۶۹۸	۵/۵۳	۷/۸۳	۵۰ / -۲۵ / ۱
			۱۴۵۳۰				۳/۹۹	۵۰ / -۲۵ / ۲
			۱۳۲۶۰				۴/۶۳	۵۰ / -۲۵ / ۳
			۱۲۵۹۰				۵/۵۴	۵۰ / -۲۵ / ۴
			۱۵۳۶۰				۵/۶۶	۵۰ / -۲۵ / ۵
۱۵۶۸/۲	۲۴۵۹۲۲۴/۰	۱۶۰۹۴/۰	۱۵۲۲۰	۱/۳۷۷	۱/۸۹۷	۵/۷۷	۴/۹۵	۶۵ / -۵ / ۱
			۱۷۶۳۰				۷/۴۵	۶۵ / -۵ / ۲
			۱۴۳۰۰				۵/۱۵	۶۵ / -۵ / ۳
			۱۵۰۳۰				۳/۹۸	۶۵ / -۵ / ۴
			۱۸۲۹۰				۷/۳۲	۶۵ / -۵ / ۵
۲۰۱۱/۲	۴۰۴۴۷۴۴/۰	۱۸۶۹۹/۰	۱۶۲۹۰	۱/۸۰۲	۳/۲۴۶	۷/۰۵	۵/۷۵	۶۵ / -۱۵ / ۱
			۱۷۳۲۰				۴/۸۵	۶۵ / -۱۵ / ۲
			۲۲۱۱۰				۹/۹۴	۶۵ / -۱۵ / ۳
			۱۸۲۵۰				۶/۶	۶۵ / -۱۵ / ۴
			۱۹۵۲۵				۸/۱۲	۶۵ / -۱۵ / ۵
۲۳۱۶/۳	۵۳۶۵۱۷۶/۰	۱۹۶۱۷/۰	۱۷۷۵۰	۱/۸۳۶	۳/۳۷۱	۷/۷۶	۷/۹۴	۶۵ / -۲۵ / ۱
			۱۸۴۲۰				۸/۰۵	۶۵ / -۲۵ / ۲
			۱۷۸۲۰				۵/۶۳	۶۵ / -۲۵ / ۳
			۲۳۹۰۰				۶/۲۵	۶۵ / -۲۵ / ۴
			۲۰۱۹۵				۱۰/۹	۶۵ / -۲۵ / ۵

جدول ۴. نتایج چقرمگی شکست (K_{IC})

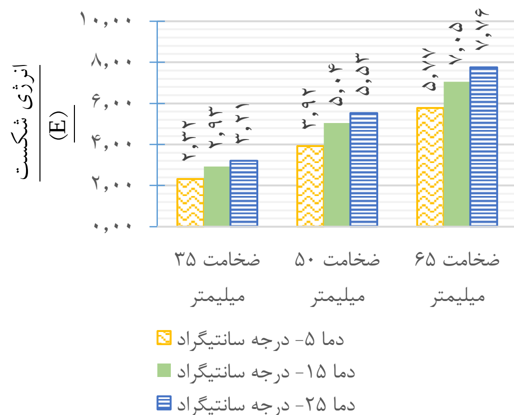
انحراف معیار چقرمگی شکست	واریانس چقرمگی شکست	میانگین چقرمگی شکست K_{IC} $(MPa.m^{0.5})$	چقرمگی شکست K_{IC} $(MPa.m^{0.5})$	X / Y
۰/۱۶	۰/۰۲	۱/۱۷	۰/۸۹	۳۵ / −۵
			۱/۰۳	۳۵ / −۱۵
			۱/۱۲	۳۵ / −۲۵
			۱/۰۸	۵۰ / −۵
			۱/۲۳	۵۰ / −۱۵
			۱/۳۴	۵۰ / −۲۵
			۱/۱۴	۶۵ / −۵
			۱/۳۳	۶۵ / −۱۵
			۱/۳۹	۶۵ / −۲۵

۶-۱. نتایج به‌دست‌آمده از انرژی شکست

در شکل ۵، انرژی شکست در هر یک از دماهای ۵−، ۱۵− و ۲۵− درجه سانتیگراد برای سه ضخامت ۳۵، ۵۰ و ۶۵ میلیمتر نشان داده شده‌است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، با تغییر ضخامت نمونه‌ها از ۳۵ به ۶۵ میلیمتر در هر یک از دماها، مقدار انرژی شکست در حدود ۱۴۵ درصد افزایش یافته‌است. شکل ۶، انرژی شکست نمونه‌ها را در هر یک از ضخامت‌های ۳۵، ۵۰ و ۶۵ میلیمتر تحت دماهای ۵−، ۱۵− و ۲۵− درجه سانتیگراد نشان می‌دهد. با توجه به شکل ملاحظه می‌گردد که با کاهش دما در هر ضخامت از نمونه‌ها، مقدار انرژی شکست افزایش می‌یابد. به‌طوری که این افزایش مقدار با تغییر دما از ۵− به ۱۵− درجه سانتیگراد نسبت به تغییر دما از ۱۵− به ۲۵− درجه سانتیگراد محسوس‌تر می‌باشد. اما در کل مشاهده می‌گردد که افزایش در مقدار انرژی شکست با کاهش دما از ۵− به ۲۵− درجه سانتیگراد در هر یک از ضخامت‌ها، تقریباً نسبت ثابتی در حدود ۳۵ الی ۴۰ درصد را شامل می‌شود.



شکل ۵. نمودار تأثیر ضخامت بر انرژی شکست نمونه‌ها تحت سه دمای آزمون

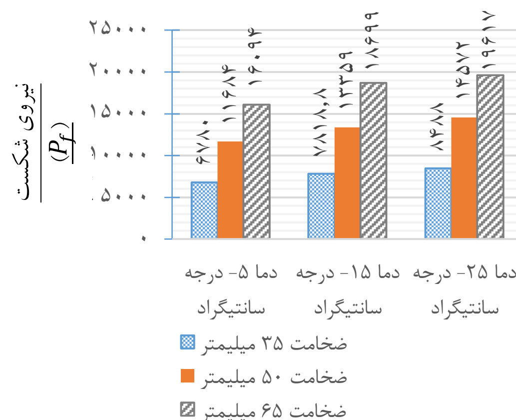


شکل ۶. نمودار تأثیر دما بر انرژی شکست نمونه‌ها در ضخامت‌های متفاوت

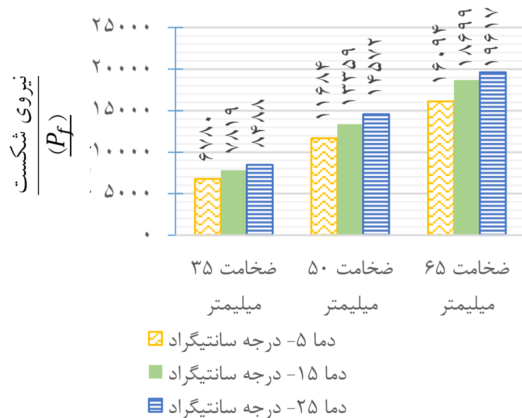
۶-۲. نتایج به‌دست‌آمده از نیروی شکست

شکل ۷، نیروی شکست را تحت هر یک از دماهای ۵- ، ۱۵- و ۲۵- درجه سانتیگراد برای سه ضخامت ۳۵، ۵۰ و ۶۵ میلیمتر نشان می‌دهد. نتایج مشخص می‌کند که در هر یک از دماها با افزایش ضخامت نمونه‌ها از ۳۵ به ۶۵ میلیمتر، مقدار نیروی شکست در حدود ۱۳۵ درصد افزایش داشته‌است.

همچنین با توجه به شکل ۸ مشاهده می‌شود که در هر ضخامت از نمونه‌ها، کاهش دما باعث افزایش مقدار نیروی شکست می‌گردد. به‌طوری که این افزایش مقدار با تغییر دما از ۵- به ۱۵- درجه سانتیگراد نسبت به تغییر دما از ۱۵- به ۲۵- درجه سانتیگراد محسوس‌تر می‌باشد. اما در کل ملاحظه می‌گردد که افزایش در مقدار نیروی شکست با کاهش دما از ۵- به ۲۵- درجه سانتیگراد در هر یک از ضخامت‌ها تقریباً نسبت ثابتی در حدود ۲۵ درصد را شامل می‌شود.



شکل ۷. نمودار تأثیر ضخامت بر نیروی شکست نمونه‌ها در سه دمای آزمون

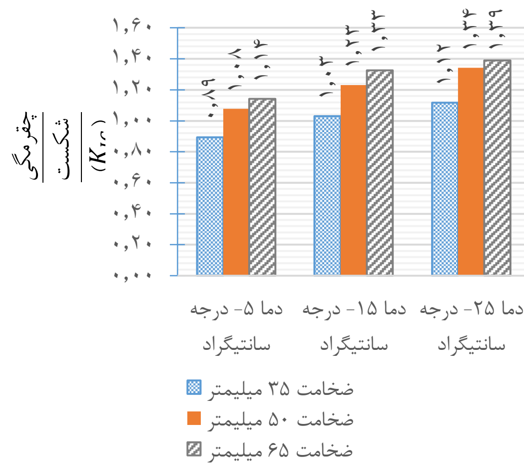


شکل ۸. نمودار تأثیر دما بر نیروی شکست نمونه‌ها در ضخامت‌های گوناگون

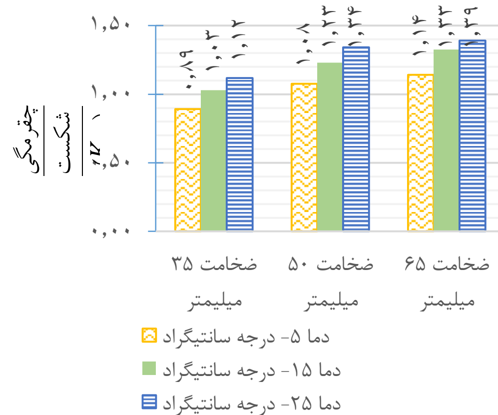
۶-۳. نتایج به‌دست‌آمده از چقرمگی شکست

در شکل ۹، چقرمگی شکست تحت هر یک از دماهای ۵-، ۱۵- و ۲۵- درجه سانتیگراد برای سه ضخامت ۳۵، ۵۰ و ۶۵ میلیمتر نشان داده شده‌است. با توجه به شکل می‌توان دریافت که با افزایش ضخامت نمونه‌ها در هر یک از دماها، مقدار چقرمگی شکست بیشتر می‌شود. این در حالی‌است که با تغییر ضخامت نمونه‌ها از ۳۵ به ۵۰ میلیمتر در هر یک از دماها، چقرمگی شکست به میزان حدود ۲۰ درصد افزایش می‌یابد و این تغییر در ضخامت‌های بالاتر به نسبت کمتری موجب افزایش در چقرمگی شکست می‌گردد. به طور کلی با تغییر ضخامت نمونه‌ها از ۳۵ به ۶۵ میلیمتر تحت دو دمای ۵- و ۱۵- درجه سانتیگراد، مقدار چقرمگی شکست حدود ۲۹ درصد و در دمای ۲۵- درجه سانتیگراد در حدود ۲۴ درصد افزایش یافته‌است. همانطور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌گردد، در هر ضخامت از نمونه‌ها، کاهش دما باعث افزایش مقدار چقرمگی شکست می‌گردد. به‌طوری که این افزایش با تغییر دما از ۵- به ۱۵- درجه سانتیگراد حدود ۱۵ درصد و برای تغییر دما از ۱۵- به ۲۵- درجه سانتیگراد به نسبت کمتری می‌باشد. با کاهش دما از ۵- به ۲۵- درجه سانتیگراد در هر یک از ضخامت‌ها،

چقرمگی شکست با نسبت تقریباً ثابتی در حدود ۲۵ درصد افزایش می‌یابد.



شکل ۹. نمودار تأثیر ضخامت بر چقرمگی شکست نمونه‌ها در سه دمای آزمون



شکل ۱۰. نمودار تأثیر دما بر چقرمگی شکست نمونه‌ها در ضخامت‌های مختلف

۷. ارائه مدل پیش‌بینی چقرمگی شکست آسفالت تحت مود I بر مبنای تأثیر دو پارامتر دما و ضخامت

به‌منظور تخمین چقرمگی شکست مخلوط آسفالتی در تحقیق حاضر با انجام آزمایش شکست ۴۵ نمونه، ابتدا مقادیر چقرمگی شکست به عنوان متغیر وابسته و دو مقدار دمای آزمون و ضخامت نمونه به عنوان متغیرهای مستقل در نرم‌افزار مَتلب تعریف شده‌اند. بدین‌منظور با میانگیری ۵ نمونه آزمایش شده در هر یک از ضخامت‌ها تحت سه دمای آزمایش، ۹ مقدار برای چقرمگی شکست در نرم‌افزار منظور گردید. به منظور اطمینان از تاثیرگذاری و سطح معناداری متغیرهای مستقل دما و ضخامت بر متغیر وابسته (چقرمگی شکست)، تحلیل واریانس[۱] انجام گردید. در این آزمون، اگر سطح معناداری کمتر مساوی پنج درصد باشد فرضیه‌ی صفر این آزمون رد می‌شود و این حاکی از این است که به احتمال ۹۵ درصد همبستگی چندگانه در جمعیت مبنای نمونه صفر نیست. پس از انجام آزمون فوق، سطح معناداری، ۰/۰۰۰ تعیین شد. با بررسی چندین تابع چندجمله‌ای در نرم‌افزار متلب، مدلی مطابق رابطه ۲ ارائه گردید (شکل ۱۱):

(۲)

$$K_{IC} = -0.1977 + 0.03824\,x - 0.02167\,y - 0.0002963\,x^2 - 0.000033\,x\,y - 0.0003667\,y^2$$

که در آن:

K_{IC}: مقدار چقرمگی شکست که بر حسب $MPa.m^{0.5}$ است،

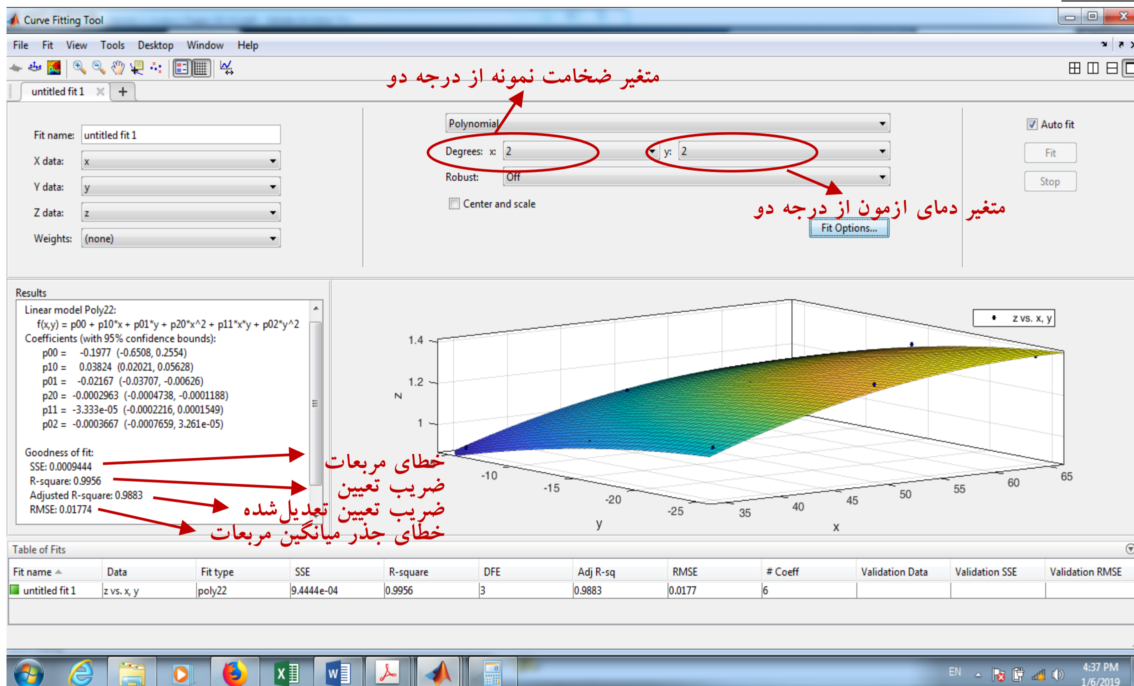
x: ضخامت نمونه که بر حسب میلیمتر است،

y: دمای آزمون که بر حسب درجه سانتیگراد است.

---

[۱] ANOVA

پارامترهای مجموع خطای مربعات[1]، ضریب تعیین[2]، ضریب تعیین تعدیل‌شده[3] و خطای جذر میانگین مربعات[4] به‌ترتیب دارای مقادیر ۰/۰۰۰۹۴۴۴، ۰/۹۹۵۶، ۰/۹۸۸۳ و ۰/۰۱۷۷۴ می‌باشند که بیانگر برازش خوب مدل است.



شکل ۱۱. ارائه مدل با استفاده از نرم‌افزار متلب

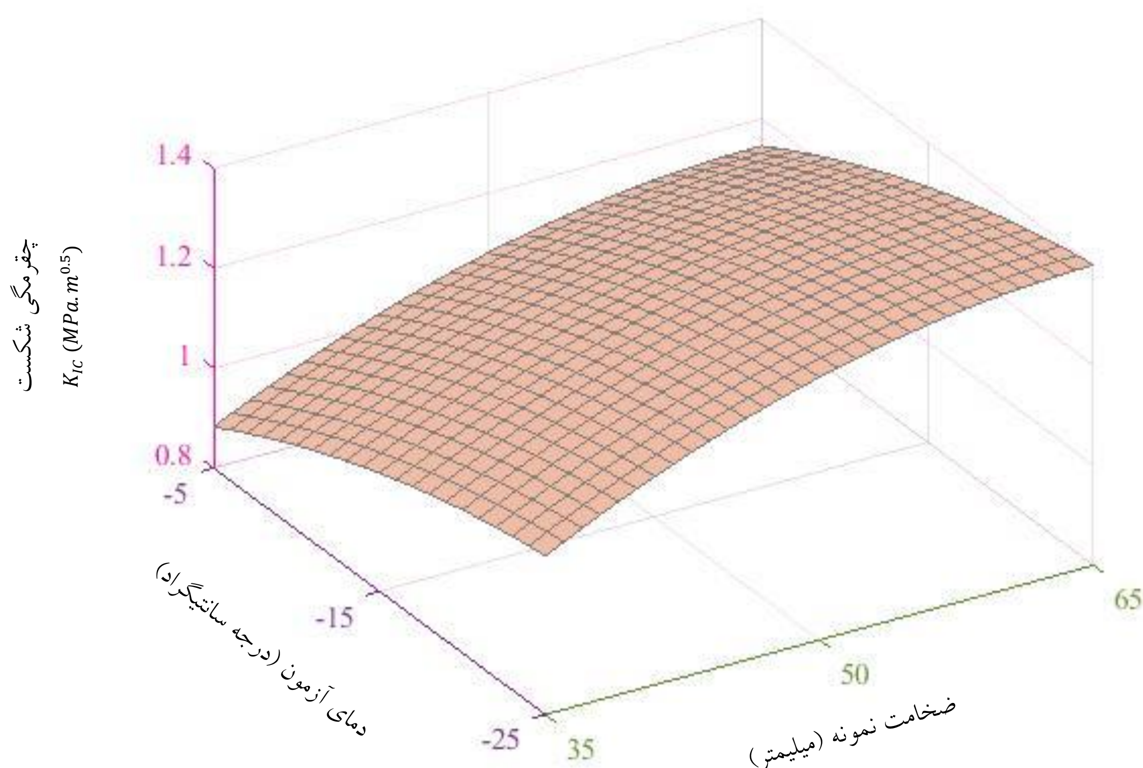
جهت اعتبارسنجی مدل ارائه‌شده، مقادیر چقرمگی شکست به‌دست‌آمده از مدل با مقادیر حاصل از انجام آزمایش مطابق جدول ۵ مقایسه گردید. همانطور که ملاحظه می‌شود، مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط مدل، اختلاف ناچیزی با مقادیر حاصل از آزمایش دارد. همچنین سطح پاسخ جهت درک بهتر از مقادیر چقرمگی شکست حاصل از مدل ارائه شده تحت تأثیر متقابل دو عامل دمای آزمون و ضخامت نمونه در شکل ۱۲ نشان داده شده‌است.

جدول ۵. مقایسه مقادیر چقرمگی شکست به‌دست‌آمده از مدل با مقادیر حاصل از آزمایش

اختلاف مقدار حاصل از آزمایش و مدل	میانگین چقرمگی شکست K_{IC} $(MPa.m^{0.5})$		دمای آزمون	ضخامت
	مدل	آزمایش		
۰/۰۱	۰/۸۸	۰/۸۹	۵ −	۳۵
۰/۰۱	۱/۰۴	۱/۰۳	۱۵ −	
۰/۰۰	۱/۱۲	۱/۱۲	۲۵ −	

[1] SSE
[2] R-Square
[3] Adjusted R-Square
[4] RMSE

۵۰	– ۵	۱/۰۸	۱/۰۸	۰/۰۰
	– ۱۵	۱/۲۳	۱/۲۴	۰/۰۱
	– ۲۵	۱/۳۴	۱/۳۳	۰/۰۱
۶۵	– ۵	۱/۱۴	۱/۱۵	۰/۰۱
	– ۱۵	۱/۳۳	۱/۳۱	۰/۰۲
	– ۲۵	۱/۳۹	۱/۴۰	۰/۰۱



شکل ۱۲. پاسخ سطحی K_{IC} براساس دو پارامتر دما و ضخامت

۸. نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

هدف اصلی این پژوهش ارزیابی چقرمگی شکست مخلوط‌های آسفالتی تحت مود I و در نهایت ارائه مدلی جهت پیش‌بینی چقرمگی شکست آسفالت تحت تأثیر دو پارامتر دما و ضخامت نمونه می‌باشد. بدین منظور ابتدا مخلوط‌های آسفالتی با سنگدانه از جنس مصالح سنگی آهکی و قیر ۷۰–۶۰ به عنوان قیر خالص ساخته‌شد. در تهیه مخلوط‌های آسفالتی، درصد فضای خالی آسفالت به میزان ۴ درصد درنظر گرفته شده است. جهت تراکم مخلوط‌ها از دستگاه متراکم کننده ژیراتوری با ۹۰ دور چرخش ژیراتوری با سرعت دوران ۳۰ دور بر دقیقه استفاده گردید. در ادامه تعداد ۴۵ نمونه نیم‌دیسک با فرض ترک اولیه به عمق تقریبی ۲۳ میلیمتر در سه ضخامت ۳۵، ۵۰ و ۶۵ میلیمتر تهیه گردید و سپس این

نمونه‌ها در سه دمای مختلف زیر صفر (۵-، ۱۵- و ۲۵- درجه سانتیگراد) تحت بارگذاری مود I با نرخ ثابت ۵ میلیمتر بر دقیقه مورد آزمایش قرار گرفتند.

در این تحقیق تأثیر دو عامل دما و ضخامت نمونه‌ها بر پارامترهای نیرو، انرژی و چقرمگی شکست در مخلوط‌های آسفالتی تحت بارگذاری مود I مورد بررسی قرارگرفت که مهمترین نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام‌شده به شرح ذیل ارائه می‌گردد:

- افزایش ضخامت نمونه‌ها و همچنین کاهش دما باعث افزایش در مقدار انرژی شکست و بار شکست گردیده‌است. به طوری که عامل ضخامت نسبت به دما تأثیر بیشتر و قابل توجهی را در این افزایش مقدار داشته است. در حالت کلی تحت هر دما، مقدار انرژی شکست و نیروی شکست در نمونه‌های با ضخامت ۶۵ میلیمتر نسبت به کمترین ضخامت نمونه‌ها (۳۵ میلیمتر) به‌ترتیب در حدود ۱۴۵ و ۱۳۵ درصد افزایش داشته‌است.
- با افزایش ضخامت نمونه‌ها تحت هر یک از دماها و همچنین با کاهش دما در هر یک از ضخامت‌ها، مقدار چقرمگی شکست به طور میانگین در حالت کلی در حدود ۲۵ درصد افزایش یافته‌است. همچنین ملاحظه می‌گردد که هرچقدر ضخامت نمونه‌ها بیشتر شود، مقدار چقرمگی شکست به نسبت کمتری افزایش می‌یابد و میل به افزایش تا یک مقدار ثابت و حداکثری را دارد. به طوری که در دمای ۲۵- درجه سانتیگراد با تغییر ضخامت نمونه از ۵۰ به ۶۵ میلیمتر، میزان چقرمگی شکست در نمونه‌ها در حدود ۴ درصد به مقدار ناچیزی افزایش یافته است. همینطور مشاهده می‌گردد که با کاهش دما در ضخامت ۶۵ میلیمتر، افزایش مقدار چقرمگی شکست به ۵ درصد رسیده‌است. با توجه به مشاهدات می‌توان نتیجه گرفت که دو عامل ضخامت و دما تأثیر تقریباً مشابهی بر میزان چقرمگی شکست نمونه‌های آسفالتی داشته‌اند.
- کمترین مقدار چقرمگی شکست در دمای ۵- درجه سانتیگراد و مربوط به کمترین ضخامت (۳۵ میلیمتر) بوده و بیشترین مقدار آن در دمای ۲۵- درجه سانتیگراد و بیشترین ضخامت (۶۵ میلیمتر) اتفاق افتاده است.
- چقرمگی شکست به دست آمده در تحقیق حاضر، مقادیری در بازه $\text{MPa.m}^{0.5}$ ۰/۸۹ و $\text{MPa.m}^{0.5}$ ۱/۳۹ داشته است که در مقایسه با نتایج به دست آمده از پژوهش محققان دیگر [9, 16, 17, 19, 20, 21, 24, 25, 26, 27] در محدوده قابل قبول و منطقی قرار دارد.
- مدل ارائه شده در تحقیق حاضر نشان داده است که توانایی تعیین مقدار چقرمگی شکست در شرایط این پژوهش را دارد. بدیهی است که این مدل صرفاً برای نوع دانه‌بندی، قیر، شرایط دمایی و ضخامت‌های فرض شده در این پژوهش، بدست آمده است.

۹. پیشنهادات آینده

جهت پژوهش‌های تکمیلی در زمینه بررسی چقرمگی شکست آسفالت تحت مود I، پیشنهاد می‌گردد که عملکرد انواع آسفالت با اختلاط‌های گوناگون مورد آزمایش قرار گیرند تا بتوان نتایج دقیق‌تری را نسبت به رفتار شکست در مخلوط‌های آسفالتی تحت تأثیر عواملی همچون نوع مصالح، نوع قیر و درصد فضای خالی آسفالت، در سایر دماها و ضخامت‌ها به‌دست آورد. همچنین با توجه به اینکه بارگذاری در تحقیق حاضر با سرعت ثابت و به صورت مونوتنیک انجام

پذیرفت، می‌توان جهت شبیه سازی بارهای اعمالی بر نمونه‌های آسفالتی و همچنین شبیه‌سازی بیشتر رفتار آسفالت در برابر رشد ترک و مکانیزم شکست، بارگذاری بر روی نمونه‌ها را به صورت سیکلیک اعمال نمود.

مراجع

۱. نشریه شماره ۲۳۴، سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور. "آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران". وزارت راه و شهرسازی، موسسه قیر و آسفالت ایران، پژوهشکده حمل و نقل، تجدید نظر اول، (۱۳۹۰).

2. Xie J., Xiao Y., Wu Sh. and Huang J., “Research on fracture characteristic of gneiss prepared asphalt mixture with direct tensile test”, Construction and Building Materials, vol. 28, pp. 476-481, (2012).
3. Liu J., Zhao Sh., Li L., Li P. and Saboundjian S., “Low temperature cracking analysis of asphalt binders and mixtures”, Cold Regions Science and Technology, vol. 141, pp. 78-85, (2017).
4. Kim K.W. and El Hussein M., “Variation of fracture toughness of asphalt concrete under low temperatures”, Construction and Building Materials, vol. 11, no. 7-8, pp. 403-411, (1997).
5. GRANT T.P., “DETERMINATION OF ASPHALT MIXTURE HEALING RATE USING THE SUPERPAVE INDIRECT TENSILE TEST”, thesis presented to the graduate school of the university of florida in partial fulfillment of the requirements for the degree of master of engineering, (2001).
6. Li X-J. and Marasteanu MO., “Using Semi Circular Bending Test to Evaluate Low Temperature Fracture Resistance for Asphalt Concrete”, Experimental Mechanics, vol. 50, pp. 867-876, (2010).
7. Aliha M.R.M. and Fattahi Amirdehi H.R., “Fracture toughness prediction using Weibull statistical method for asphalt mixtures containing different air void contents”, Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, vol. 40, no. 1, pp. 1-14, (2016).
8. Ameri M., Mansourian A., Pirmohammad S., Aliha M.R.M. and Ayatollahi M.R., “Mixed mode fracture resistance of asphalt concrete mixtures”, Engineering Fracture Mechanics, vol. 93, pp. 153-167, (2012).
9. Some´ S.C., Fredj M.A. and Nguyen M-L., “Multi-parametric characterization of mode I fracture toughness of asphalt concrete: Influence of void and RA contents, binder and aggregate types”, International Journal of Pavement Research and Technology, vol. 11, no. 3, pp. 274-284, (2018).

۱۰. بهبهانی، ح.، علیها، م. ر. م.، آقاجانی شهریور، س. و آسایش زارچی، ح. "بررسی مقاومت شکست مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده با استفاده از آزمایش نیم‌دیسک تحت بار خمشی". مهندسی عمران شریف، دوره ۲–۳۱، شماره ۳/۱، یادداشت فنی، ۱۳۵–۱۲۹، (۱۳۹۴).

۱۱. علیها، م. ر. م.، رضایی‌فر، م. ح. و فضائلی، ح. "بررسی آزمایشگاهی چقرمگی شکست بتن‌های آسفالتی تحت مودهای ترکیبی کششی–برشی". مجله علمی–پژوهشی، عمران مدرس، دوره پانزدهم، شماره یک، (۱۳۹۴).

12. Im S. and Ban H., “Characterization of mode-I and mode-II fracture properties of fine aggregate matrix using a semicircular specimen geometry”, Construction and Building Materials, vol. 52, pp. 413-421, (2014).
13. Champion L., Gerard J-F., Planche J-P., Martin D. and Anderson D., “Low temperature fracture properties of polymer-modified asphalts relationships with the morphology”, Journal of Materials Science, vol. 36, no. 2, pp. 451-460, (2001).
14. Mull M.A., Stuart K. and Yehia A., “Fracture resistance characterization of chemically modified crumb rubber asphalt pavement”, Journal of Materials Science, vol. 37, no. 3, pp. 557-566, (2002).

۱۵. فخری، م. و کریمی ابیانه، پ. "بررسی نحوه گسترش ترک‌های خستگی در روسازی آسفالتی در اثر تغییر دما، با استفاده از فرضیه مکانیک شکست" مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل، سال اول، شماره دوم، ۶۲–۵۵، (۱۳۹۴).

16. Aliha M.R.M., Behbahani H., Fazaeli H. and Rezaifar M.H., “Experimental study on mode I fracture toughness of different asphalt mixtures”, Scientia Iranica A, vol. 22, no. 1, pp. 120-130, (2015).

۱۷. گلچین، ب. و صفایی، ر. "تأثیر الیاف کربن بر مقاومت شکست مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از اصول مکانیک شکست الاستیک خطی" مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل، سال چهارم، شماره دوم، پیاپی چهاردهم، ۹۲–۷۷، (۱۳۹۷).

۱۸. جعفری حقیقت‌پور، پ.، کی‌منش، م. ر. و علیها، م. ر. م. "بررسی مشخصات مخلوط‌های آسفالتی مقاوم در برابر شکست مود III خالص" مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل، سال چهارم، شماره اول، پیاپی سیزدهم، ۸۵–۷۱، (۱۳۹۷).

19. Kim K.W., Kweon S.J., Doh Y.S. and Park T-S., “Fracture toughness of polymer-modified asphalt concrete at low temperatures”, Can. J. Civ. Eng., vol. 30, no. 2, pp. 406-413, (2003).

20. Razmi M. and Mirsayar M.M., “Fracture resistance of asphalt concrete modified with crumb rubber at low temperatures”, International Journal of Pavement Research and Technology, vol. 11, no. 3, pp. 265-273, (2018).

21. Aliha M.R.M., HaghighatPour P.J. and Keymanesh M.R., “Evaluating Mode I Fracture Resistance in Asphalt Mixtures Using Edge Notched Disc Bend ENDB Specimen with Different Geometrical and Environmental Conditions”, Engineering Fracture Mechanics, vol. 190, pp. 245-258, (2018).

22. Fakhri M., Haghighat Kharrazi E. and Aliha M.R.M., “Mixed mode tensile - in plane shear fracture energy determination for hot mix asphalt mixtures under intermediate temperature conditions”, Engineering Fracture Mechanics, vol. 192, pp. 98-113, (2018).

23. Ayatollahi M.R. and Aliha M.R.M., “Wide range data for crack tip parameters in two disc-type specimens under mixed mode loading”, Computational Materials Science, vol. 38, no. 4, pp. 660-670, (2007).

24. Mansourian A., Razmi A. and Razavi M., “Evaluation of fracture resistance of warm mix asphalt containing jute fibers”, Construction and Building Materials, vol. 117, pp. 37-46, (2016).

25. Ren J. and Sun L., “Characterizing Air Void Effect on Fracture of Asphalt Concrete at Low-temperature using Discrete Element Method”, Engineering Fracture Mechanics, vol. 170, pp. 23-43, (2017).

26. Ziari H., Aliha M.R.M., Moniri A. and Saghafi Y., “Crack resistance of hot mix asphalt containing different percentages of reclaimed asphalt pavement and glass fiber”, Construction and Building Materials, vol. 230, (2020).

27. Some´ S.C., Feeser A. and Pavoine A., “Numerical and experimental investigation of mode I cracking of asphalt concrete using semi-circular bending test”, Construction and Building Materials, vol. 169, pp. 34-46, (2018).